

ラジアルターピンのVGSノズル内の流れに関する研究：スクロール形状とノズルペーンの影響

著者	畑中 健太郎
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	60
ページ	1-6
発行年	2019-03-31
URL	http://doi.org/10.15002/00021980

ラジアルタービンの VGS ノズル内の流れに関する研究 -スクロール形状とノズルベーンの影響-

STUDY ON FLOW IN VGS NOZZLE OF RADIAL TURBINE -EFFECTS OF SCROLL PASSAGE SHAPE AND NOZZLE VANE-

畑中健太郎

Kentaro HATANAKA

指導教員 辻田星歩 教授

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

In this study, the effects of the scroll passage shape and the nozzle vane on the flow behavior at the inlet of turbine impeller of turbocharger with VGS were investigated experimentally at the middle and the high flow rate conditions by using 5-hole Pitot tube. The oil flow visualizations were also conducted on the solid walls inside the nozzle to examine the flow behavior in detail and to verify the data obtained by 5-hole Pitot tube. The experimental results clarified that the effects of the overhang shape of scroll and the existence of the nozzle vane especially on the circumferential uniformity of the flow field at the outlet of the nozzle region depended on the flow rate.

Key Words: Turbocharger, Radial Turbine, VGS, Scroll Passage shape, Nozzle Vane, Clearance

1. 結論

近年、様々な環境問題が世界的に深刻化している。そのため、大気汚染物質の排出割合が大きい自動車に対して、排気ガス規制の強化が世界各国で広がっている。この排気ガス規制の対策として自動車のエンジンのダウンサイジング化が進展しており、それに伴う出力の低下を補うためにターボチャージャの搭載が普及している。近年では特に、エンジンの回転数の変化に応じてタービン羽根車入口の外周側に設けられたノズルベーンの開度を調整できる、可変ノズル機構(VGS)搭載型ターボの採用が増加している[1]。

ラジアルタービンはターボチャージャの性能を左右する主要構成要素であり、空気力学的性能のさらなる向上を図るには、タービン羽根車だけでなく、その上流および下流側の構成要素内の流れの挙動を解明することが必要不可欠である。

VGS ターボのタービン羽根車上流側の構成要素内の流れ場に着目した研究では、スクロールを含むノズル全周を対象とした CFD 解析により、スクロール形状の非軸対称性がノズルへ流入する流れの周方向および軸方向の分布の非一様性を舌部付近で強めることが示されている[2]。また、高温の排気ガスに晒されているノズルベーンを角度を、エンジン回転数に応じて円滑に変えるには、熱膨張を考慮してノズルベーン間隙を比較的大きめに設定する必要があり、その結果、間隙を通過する流れ

に起因する損失増加およびタービン羽根車への絶対流入角の低下によりタービン効率を低下させてしまう[3]。

ノズルベーン開度とノズルベーン間隙の影響を調査した研究では、ノズル出口流れ場の全周を 5 孔ピトー管で計測し、ノズルベーン開き側ではノズルベーン後流の影響が、一方、閉じ側ではノズルベーン間隙流れの影響がそれぞれ支配的になることが示されている。さらに、そのノズルベーン間隙の影響はスクロールのオーバーハング形状により Hub 壁側間隙の方が Shroud 壁側間隙より強く表れることが示唆された[4]。

本研究では、スクロールがノズル内部流れに与える影響を解明するため、ノズルベーンが存在する条件と存在しない条件の 2 条件に対して、5 孔ピトー管を用いた実験的手法により、ノズル出口全周の流れ場を調査した。さらに、エンジン排気流量が中および大流量を想定した 2 条件に設定し、流量の変化がノズル内部流れに与える影響についても調査した。また、ノズル内の固体壁面近傍の流れの挙動を調査するために、油膜法可視化実験を各条件に対して行った。また、内部流動測定結果を油膜法可視化結果と比較検証することにより、両結果の妥当性の相互評価を行うと共にノズル内の流れの挙動の詳細を明らかにした。

2. 実験装置

図 1 に本研究で用いた実験装置の全体図を、図 2 に概

略図を示す．図 3 には図 2 中の赤枠で囲まれたタービンノズル領域の拡大図を，また表 1 に各種寸法を示す．実験対象のターボチャージャは，圧縮機のスクロールと羽根車，回転軸と軸受装置およびタービン羽根車を取り外し，羽根車と同じ Hub 側子午面形状を有し，円錐型で翼のついていないタービン Hub モデル静止流路およびノズル出口測定装置を圧縮機側から装着している．ノズル出口測定装置は，5 孔ピトー管を軸方向に移動させるアクチュエータと，周方向に移動させるステッピングモータにより構成されている．作動流体にはスクリーコンプレッサからの圧縮空気を用いた．スクリーコンプレッサからの圧縮空気は，その脈動を抑えるために圧力タンクを介して，高圧ゴムホースにより流量計測用の質量流量計へ導かれ，異形断面接続管を経てタービンスクロールに流入する．また，異形断面接続管には JIS 型ピトー管および熱電対が装着され，タービン入口全圧および全温が測定可能である．ノズルの間隙位置とノズルペーンの角度の調節機構を図 4 に示す．間隙位置の調節には，板厚 $0.1 \pm 0.008 \text{ mm}$ のスペーサーを用いることで 0.1 mm 間隔の間隙位置の微調節を可能とした．また，高精細 3D プリンタ (KEYENCE 製, AGILISTA-3200) でノズル領域の流路高さ ($H=11.26 \text{ mm}$) と同値の高さ寸法の樹脂製のペーンを作成し，それを用いることにより，間隙無しの条件の設定を可能とした．

3. 実験条件および方法

本実験では，ノズル出口の流れ場を測定するために，タービン羽根車および圧縮機側構成要素を取り外して，代わりにノズル出口測定装置を挿入した．実験条件を表 2 に示す．スクロールがノズル内部流れ場に与える影響を調査するために，ノズルペーン有りと無しの 2 条件に設定した．流量は，エンジン排気流量がそれぞれ中 (Middle) および高 (High) 流量域の 2 条件に設定して実験を行った．ノズルペーン角度は各流量において，タービンの想定回転数が同一になるように設定した．図 5 にペーン設定角度の定義を示す．各ノズル開度 (ペーン角度) に対する 5 孔ピトー管先端部と半径方向 r のなす角度 α_p は (図 5)，その先端部がほぼ流れの主流方向に向くように設定した．11 枚のペーンの位置関係を図 6 に示す．V1～V11 はペーンの位置番号を， θ は舌部の対向側を原点 0 度とし羽根車の回転方向を正として定義した周方向測定位置を示している．図 7 に測定点位置の概略図を示す．測定点数は，軸方向 (ペーンスパン方向) に 1.5 mm 間隔に $N_z=6$ 点，周方向に 2 度間隔で一周分の $N_\theta=180$ 点で合計 $1,080$ 点である．各測定点においてサンプリング周波数は 500 Hz ，サンプリング点数は $1,000$ 点でデータを収集し，その算術平均値を実験結果のデータ処理に用いた．図 8 に各速度成分の定義を示す．流速 V の周方向，半径方向，軸方向の成分をそれぞれ V_θ ， V_r ， V_z とする．また α_{pN} ， α_{yN} はノズルからの軸方向流出角 (ピッチ角) と周方向流出角 (ヨー角) を表している．また，実機における VGS ターボでは，高温高圧環境下でノズルペーンを円滑に制御するためにノズルペーン間隙 (以下，CL) が設けられている．本研究においては，CL の存在がノズル内の流れ場に与える影響についても調べるために，CL の存在の有無と存在位置を考慮した実験を行った．図 9 にノズルペ

ンの有無と，CL の影響を調べるための実験条件を規定するノズルペーン model を示す．ここで，ノズル領域内の CL の Hub 側壁面からの大きさを CL_H ，Shroud 側壁面からの大きさを CL_S と定義する．ノズルペーン model は，ノズルペーンが無い model NV，CL を Hub 側にのみ設定した model HC ($CL_S=0.0 \text{ mm}$ ， $CL_H=0.2 \text{ mm}$)，CL を Shroud 側にのみ設定した model SC ($CL_S=0.2 \text{ mm}$ ， $CL_H=0.0 \text{ mm}$)，CL を無しに設定した model NC ($CL_S=0.0 \text{ mm}$ ， $CL_H=0.0 \text{ mm}$) の 4 種類である．修正質量流量を基準値から $\pm 1\%$ 以内に収まるように設定し，各実験条件に対して 3 回の実験を行い，それらを算術平均した値をデータ処理に用いた．また，ノズル内の固体壁面近傍における流れの挙動を調査するために用いた油膜の質量配合比は，流動パラフィン，酸化チタン，オレイン酸を $5:3:2$ とした．実験は修正質量流量を目標値に設定した後に，15 分間運転した時点での結果をデジタルカメラで撮影し記録した．



図 1 実験装置全体図

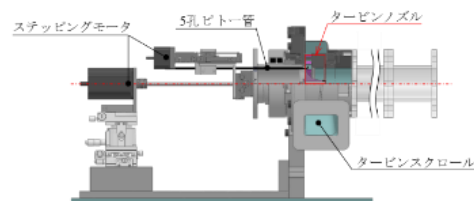


図 2 実験装置概略図

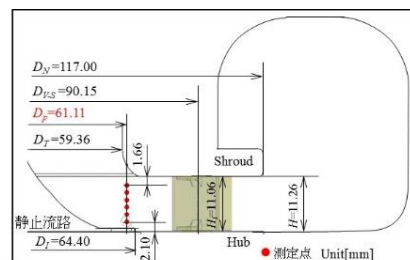


図 3 タービンノズル領域の概略図



(a) 全体図 (b) 拡大図
図 4 ノズル間隙および角度調節機構

表 1 タービンノズル領域の各種寸法

ノズルプレート外径	D_N	mm	$\phi 117.00$
ペーンスピンドル位置	D_{V-S}	mm	$\phi 90.15$
5 孔ピトー管測定位置	D_P	mm	$\phi 61.11$
羽根車出口直径	D_T	mm	$\phi 59.36$
静止流路直径	D_I	mm	$\phi 64.40$
ペーン高さ	H_I	mm	11.06
ノズル流路高さ	H	mm	11.26

表 2 実験条件

			流量	
			Middle	High
5 孔ピトー管先端 角度	α_p	deg.	75.0	
ベーン設定角度	α_v	deg.	73.2	65.9
周方向測定間隔	ΔN_θ	deg.	2.0	
周方向測定点数	N_θ	-	180	
軸方向測定間隔	ΔN_Z	mm	1.5	
軸方向測定点数	N_Z	-	6	
修正質量流量	G_θ	kg/h	140.3	179.6

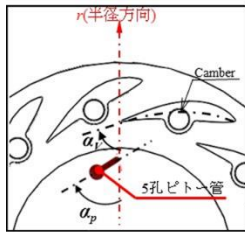


図 5 ノズルベーン設定角度

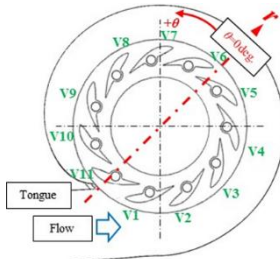


図 6 ノズルベーン全体図と各要素の定義

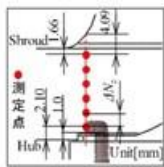


図 7 測定点概略図

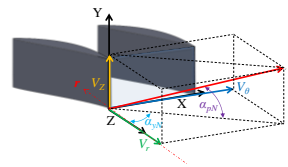


図 8 各速度成分の定義

model NV	model HC	model SC	model NC
Shroud	Shroud	Shroud	Shroud
Hub	Hub	Hub	Hub
	$CL_{S_g} = 0.0 \text{ mm}$ $CL_{H_g} = 0.2 \text{ mm}$	$CL_{S_g} = 0.2 \text{ mm}$ $CL_{H_g} = 0.0 \text{ mm}$	$CL_{S_g} = 0.0 \text{ mm}$ $CL_{H_g} = 0.0 \text{ mm}$

図 9 ノズルベーン model

4. 結果および考察

(1) 5 孔ピトー管による測定結果

a) Middle 流量域の場合

表 3 に Middle 流量域の場合のスクロール入口条件を示す。図 10 に各ノズルベーン model の、周方向に算術平均をした半径方向速度 $V_{r,c}$ 、周方向速度 $V_{\theta,c}$ 、軸方向速度 $V_{z,c}$ 、流速 V_c 、流出角 $\alpha_{yN,c}$ 、全圧損失係数 $C_{pt,c}$ のスパン方向分布を示す。縦軸はスパン方向測定位置をノズル流路高さで無次元化した Y/H であり、0.0 が Hub、1.0 が Shroud に対応する。図 11 に各ノズルベーン model の Shroud 壁近傍、Midspan 近傍、Hub 壁近傍における、半径方向速度 V_r 、周方向速度 V_θ 、流出角 α_{yN} 、全圧損失係数 C_{pt} の周方向分布を示す。横軸の θ は周方向測定位置である。

修正質量流量を固定して実験を行っているため、図 10 の半径方向速度 $V_{r,c}$ が各 model 間でほぼ一致していることが確認できる。また、スクロール入口条件において、model NV の入口全圧は他のノズルベーン model と比べ

表 3 スクロール入口条件(Middle 流量域)

model	大気圧 [hPa]	入口全圧 [Pa]	入口温度 [°C]
NV	1001	1814	17.7
NC	1012	4740	19.5
HC	994	5032	18.3
SC	1004	4847	18.2

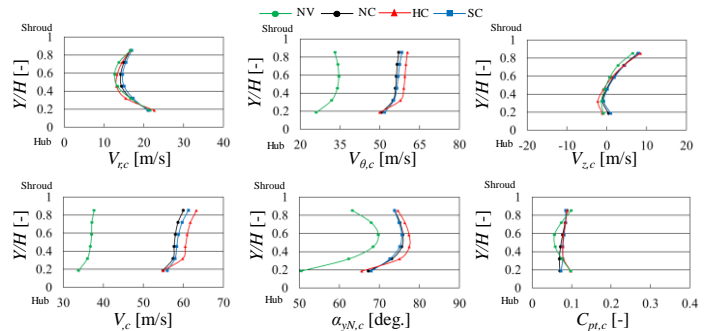


図 10 周方向算術平均値のスパン方向分布 (Middle 流量域)

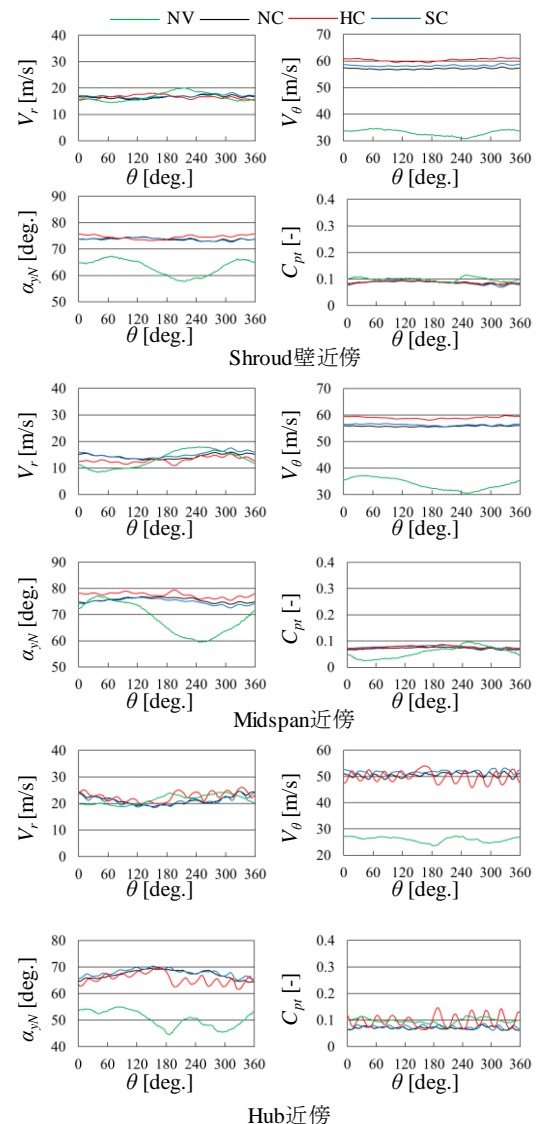


図 11 周方向分布(Middle 流量域)

て抵抗が小さいため低下している(表 3). 全てのノズルベーン model に対して, Shroud 側と比較して Hub 側で半径方向速度 $V_{r,c}$ は増加し, 同位置で周方向速度 $V_{\theta,c}$ が低下しており(図 10), その結果, Hub 側で流出角 $\alpha_{yN,c}$ が低下していることが分かる(図 10). この傾向は, model NV でも定性的に同様であることから, ノズル上流側の影響であると分かり, スクロールのオーバーハング形状に起因する Hub 側への主流の偏りによるものと考えられる. 次に, model NV に着目すると, 周方向速度 $V_{\theta,c}$ および流出角 $\alpha_{yN,c}$ では他のノズルベーン model と比べて低下し, 全圧損失係数の分布においては Midspan 近傍で低下していることが分かる(図 10). これはベーンによる拘束が無くなったためと考えられる.

Hub 壁近傍の全ての物理量の周方向分布で, model HC が model NC および model SC とは異なる変動波形を示している(図 11). これは青木ら[4]より, 逆漏れ流れの影響であると考えられている. また model HC の Hub 側でのみこの影響が見られたのはスクロールのオーバーハング形状の影響であると示されている.

Shroud 壁近傍および Midspan 近傍の周方向分布で, model NV に着目すると他のノズルベーン model と比べて周方向測定位置の舌部付近で半径方向速度 V_r が増加し, 同位置の周方向速度 V_θ が低下していることが分かる(図 11). その結果, 舌部付近に向かって流出角 α_{yN} が低下していることが確認できる(図 11). これはスクロールの舌部付近では舌部の形状により流れが半径方向へ偏向されるためと考えられる. Hub 壁近傍においては半径方向速度 V_r が舌部付近までは, Midspan 近傍および Shroud 壁近傍と同様の傾向を示している(図 11). 一方, 周方向測定位置 $\theta=240$ deg. 付近で, 局所的に半径方向速度 V_r が低下し, 周方向速度 V_θ が増加していることが分かる(図 11). その結果, 同位置で流出角 α_{yN} が増加していることが確認できる(図 11). これは舌部から半径方向へ向かう流れの一部がノズル内で再循環することにより, ノズル出口の $\theta=240$ deg. 付近で局所的に周方向速度 V_θ と共に流出角 α_{yN} を増加したと考えられる. この傾向が, Hub 側でのみ強く現れたのはスクロールのオーバーハング形状の影響により, 全体的に流れが Hub 側に流れが偏っているためと考えられる. 一方, model NV を除く他のノズルベーン model では, Shroud 壁近傍および Midspan 近傍で舌部に向かって流出角 α_{yN} が低下する傾向が殆んど見られない(図 11). したがって, ベーンはスクロール形状に起因する流れの非一様を緩和する効果があると考えられる. しかし, model HC では Hub 壁近傍の舌部付近で流出角が若干低下していることが確認できる. この結果より Hub 側に CL を設けた場合, その緩和の程度は若干弱まることが示唆された.

b) High 流量域の場合

表 4 に High 流量域の場合のスクロール入口条件を示す. 図 12 に各ノズルベーン model の周方向に算術平均をしたスパン方向分布を, 図 13 に Shroud 壁近傍, Midspan

表 4 スクロール入口条件(High 流量域)

model	大気圧 [hPa]	入口全圧 [Pa]	入口温度 [°C]
NV	1001	2244	17.6
NC	1004	4097	18.5
HC	1002	4188	19.0
SC	1014	4142	18.5

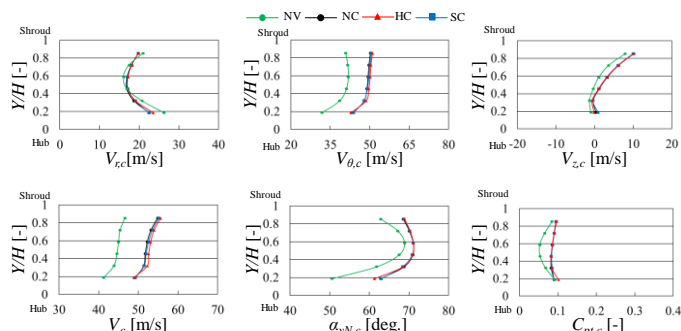


図 12 周方向算術平均値のスパン方向分布 (High 流量域)

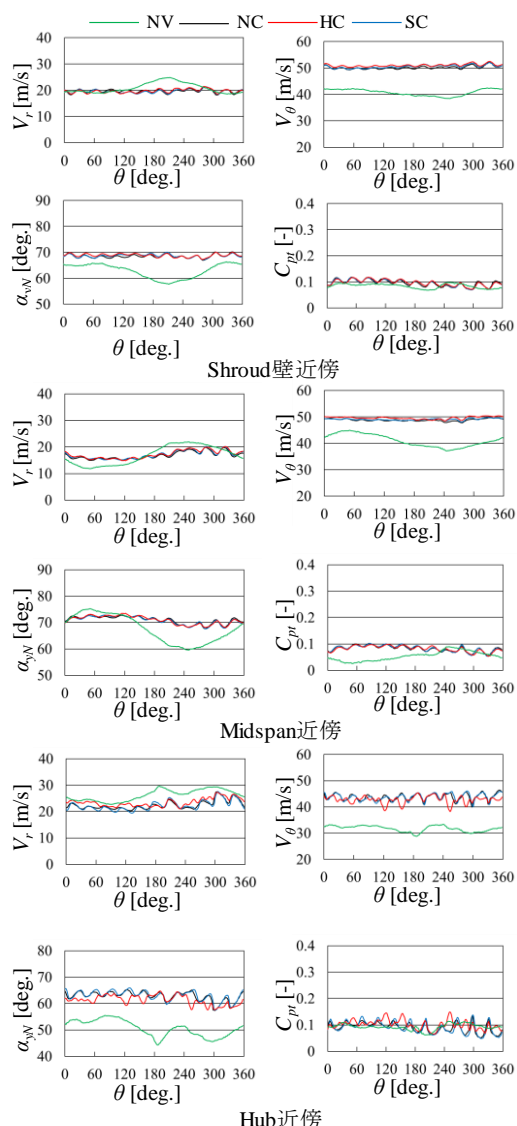


図 13 周方向分布(High 流量域)

近傍, Hub 壁近傍における, 周方向分布の図を Middle 流量域と同様の形式で示す.

修正質量流量を固定して実験を行っているため, 図 12 の半径方向速度 $V_{r,c}$ がほぼ一致していることが確認できる. また, スクロール入口条件において, model NV で他のノズルベーン model と比べて抵抗が小さいため, 入口全圧が低下していることが Middle 流量域と同様に High 流量域でも確認できる(表 4). 半径方向速度 $V_{r,c}$ の分布においては, スクロールのオーバーハング形状に起因する Hub 側への流れの偏りが確認できる(図 12).

各スパン方向測定位置での周方向分布に着目すると model NV を除く他のノズルベーン model においては, 明確な周期的変動波形が現われており, model 間ではほぼ一致していることが分かる(図 13). 青木ら[4]によってこの変動波形はベーンのウェークの影響であることが示されている.

model NV に着目すると, Shroud 壁近傍および Midspan 近傍の周方向分布で他のノズルベーン model と比べて周方向測定位置の舌部付近で半径方向速度 V_r が増加し, 同位置の周方向速度 V_θ が低下していることが分かる(図 13). その結果, Middle 流量域と同様に, 舌部付近に向かって流出角 α_{yN} が低下していることが確認できる. これは Middle 流量域と同様にスクロールの舌部の形状によるものと考えられる. Hub 壁近傍においては, 半径方向速度 V_r で舌部付近までは Midspan 近傍および Shroud 壁近傍と同様の傾向を示していることが分かる(図 13). 一方, 周方向測定位置 240 deg. 付近で半径方向速度 V_r が局所的に低下し, 同位置の周方向速度 V_θ が局所的に増加していることが分かる(図 13). その結果, 同位置で流出角 α_{yN} が増加していることが確認できる(図 13). これらの傾向は Middle 流量域でも確認できた舌部から半径方向へ向かう流れの一部がノズル内で再循環することによるものと考えられる. さらに High 流量域でも同様の傾向が見られたことから, この現象は流量に依存しないことが分かる.

model NV を除く, 他のノズルベーン model では, 舌部に向かって流出角 α_{yN} が低下する傾向がほぼ見られない(図 13). したがって, High 流量域でもベーンはスクロール形状に起因する非一様な流れを緩和する効果があると考えられる. また High 流量域では model HC でもこの効果が確認できた.

(2) 油膜法による可視化実験結果

a) Middle 流量域の場合

図 14 に Middle 流量域の場合の model HC および model SC のノズルベーン, V3, V7, V9 の CL を設定した壁面側の CL 内を含む可視化結果を示す. CL 内において両モデルを比較すると, model HC ではベーン前縁部では淀み状態を示す油溜りが存在するが, ベーン後縁部では逆漏れ流れを示す流跡線が明確に確認できる(図 14). 一方, model SC では model HC と比べ, 逆漏れ流れを示す流跡線がほぼ存在せず, 淀み状態を示す油溜りが CL 内に多く存在する(図 14). この結果から CL 内を通過する逆漏れ流れは Hub 側に CL を設けた場合はベーン後縁部で確認でき, Shroud 側に CL を設けた場合はほとんど発生していないことが分かる. したがって, 内部流動測定の周方向分布(図 11)の Hub 壁近傍で model HC が model NC および model SC と異なる変動波形を示していたのは, ベーン後縁部からの逆漏れ流れの影響であることが分かる.

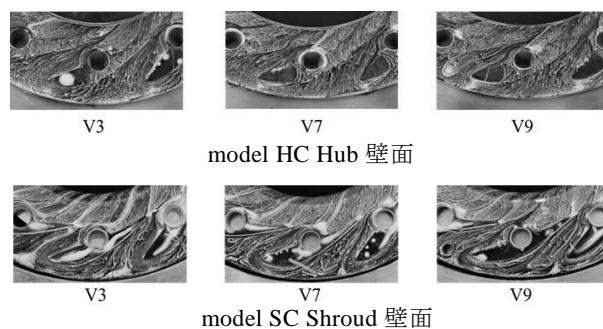


図 14 ノズル壁面上の可視化結果
(Middle 流量域)

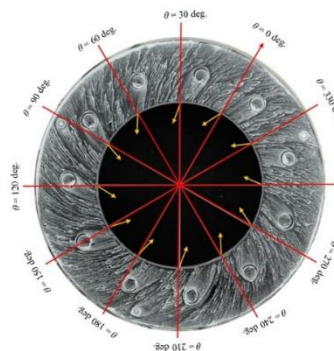


図 15 model NV Hub
壁面上の可視化結果
(Middle 流量域)

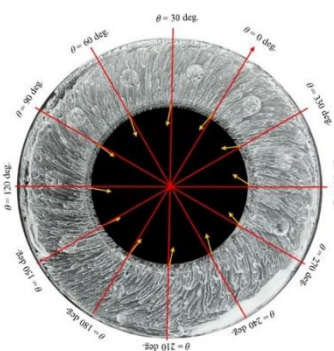


図 16 model NV Shroud
壁面上の可視化結果
(Middle 流量域)

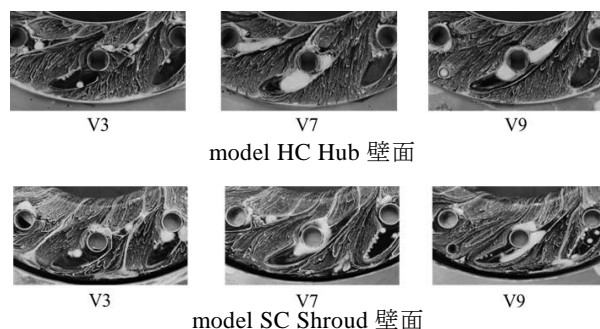


図 17 ノズル壁面上の可視化結果
(High 流量域)

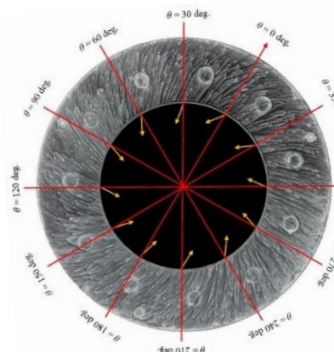


図 18 model NV Hub
壁面上の可視化結果
(High 流量域)

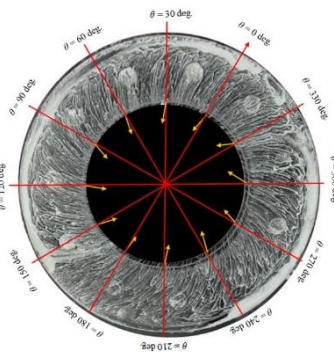


図 19 model NV Shroud
壁面上の可視化結果
(High 流量域)

図 15 に model NV の Hub 壁面を、図 16 に Shroud 壁面の可視化結果を示す。赤い矢印は半径方向を示し黄色の矢印は流跡線に沿って引いた流れを示している。Hub 壁面(図 15)に着目すると周方向位置 0 deg.から舌部近傍である 180 deg.まで流出角が減少し、180 deg.付近から 240 deg.付近は流出角が増加していることが分かる。Shroud 壁面(図 16)の可視化結果に着目すると周方向位置 0 deg.から舌部近傍である 180 deg.まで流出角が僅かに減少し、180 deg.から 360 deg.にかけては、流出角が増加している傾向が確認できる。これらの傾向は、内部流動測定 of 周方向分布(図 11)の Shroud 壁近傍および Hub 壁近傍の流出角 α_{yN} においても確認できた。したがって、内部流動測定と油膜法可視化結果において同様の傾向が確認できる。

Shroud 壁面(図 16)のノズル入口付近に着目すると、油溜りが存在していることが分かる。これはスクロールのオーバーハング形状の影響だと考えられる。一方、その影響が少ないスクロール舌部付近では、ノズル入口付近で流跡線が明確に確認できる。したがって、可視化結果からスクロールのオーバーハング形状による影響を定性的に確認できた。

b) High 流量域の場合

図 17 に High 流量域の場合の model HC および model SC の CL を設定した壁面側の CL 内を含む可視化結果を Middle 流量域と同様の形式で示す。両モデルの CL 内に着目すると、CL 内全体で淀み状態を示す油溜りが確認できる。また、両 CL 内において逆漏れ流れを示す流跡線がほぼ確認できないことが分かる。したがって、High 流量域では CL の存在による逆漏れ流れの影響は小さいと考えられる。

図 18 に model NV の Hub 壁面を、図 19 に Shroud 壁面の可視化結果を Middle 流量域と同様に示す。Hub 壁面(図 18)の可視化結果に着目すると周方向位置 0 deg.から舌部近傍である 180 deg.まで流出角が減少し、180 deg.付近から 240 deg.付近は流出角が増加していることが分かる。Shroud 壁面(図 19)の可視化結果に着目すると周方向位置 0 deg.から舌部近傍である 180 deg.まで流出角が僅かに減少し、180 deg.から 360 deg.にかけては、流出角が増加している傾向が確認できる。これらの傾向は、内部流動測定 of 周方向分布の Shroud 壁近傍および Hub 壁近傍の流出角からも確認できた(図 13)。したがって、Middle 流量域と同じく内部流動測定と油膜法可視化結果において同様の傾向が確認できる。

また、Shroud 壁面のノズル入口付近に着目すると油溜りが存在していることから、これは Middle 流量域と同様にスクロールのオーバーハング形状の影響だと考えられる。

以上の油膜法可視化結果から、High 流量域でも Middle 流量域と同様の傾向が確認できることから、model NV のノズル内の流動現象の定性的なメカニズムは流量に依存しないことが分かった。

5. 結論

本研究より以下の結論が得られた。

1. スクロール形状とノズルベーンがノズル出口流れ場の一様性に与える影響について明らかにした。
2. スクロールのオーバーハング形状により、ノズル内の流れの主流は Hub 側に偏る。
3. スクロール形状の影響により、ノズル出口流れ場の周方向の一様性は低下し、流出角は舌部に向かって減少する。また、この一様性の低下はノズルベーンが存在により緩和される。
4. ノズルベーンが存在しない場合、ノズル内の定性的な流動現象は流量に依存しない。また、スクロールからノズルへ流入する流れは舌部で再循環しノズルへ再度流入することが示唆された。
5. ノズルベーンが存在する場合、Middle 流量域では Hub 側に間隙を設けると、ベーン後縁部において逆漏れ流れの影響が強くなり、ノズル出口流れ場の周方向の一様性を低下させる。一方、High 流量域ではベーン後縁ウェークの増強によりノズル出口流れ場の周方向の一様性を低下させる。

参考文献

- 1) 井上・他 3 名, RHV4 可変容量型(STEP4)ターボチャージャの開発, 石川島播磨技報 Vol.51, No.3(2011).
- 2) Ota, S., Kawakubo, T., A Numerical Study on the Three-Dimensional Flows in the Scrolls and Nozzles of a Radial Turbine for a variable Geometry Automotive Turbocharger, IGTC2007-186(2007).
- 3) Yamagata, A., CFD analysis of a variable nozzle turbine for automotive turbocharger considering actual geometries, IGTC2011-0239(2011).
- 4) 青木亮祐, "ラジアルタービンの VGS ノズル内の流れに関する実験的研究-ノズルの開度と間隙位置の影響-", 法政大学修士論文(2017).